第46卷 第8期
2023年8月

核 技 术 NUCLEAR TECHNIQUES
www.hjs.sinap.ac.cn

Vol.46, No.8
August 2023

HI-13串列加速器运维35周年的实践与创新

李康宁 阚朝新 王晓飞 胡跃明 杨丙凡 秦久昌 关遐令 苏胜勇
包轶文 游曲波 王 华 周建明 樊启文 刘德忠 杨 涛 胡任威 杨保君
（中国原子能科学研究院 北京 102413）

摘要 北京串列加速器核物理国家实验室HI-13串列加速器（以下简称串列加速器）投入运行已有35周年的时间了。为了保持这台加速器的性能，运维团队以保障加速器的运行能力为中心，分别从攻克加速器关键部件研制、培养好运维人员队伍以及提高机时利用效率等几个方面开展了工作。其中，重点阐述了关键部件研制及子系统的升级改造。通过这些工作的开展，保持并提升了这台加速器的性能，加速器也处于良好的安全稳定运行状态。最后，指出了串列加速器所面临的问题及未来的发展规划。

关键词 HI-13串列加速器，运行维护，关键部件研制，子系统升级改造
中图分类号 TL99
DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080005

Practice and innovation in the operation and maintenance of HI-13 tandem accelerator for 35 years

LI Kangning KAN Chaoxin WANG Xiaofei HU Yueming YANG Bingfan QIN Jiuchang GUAN Xialing SU Shengyong BAO Yiwen YOU Qubo WANG Hua ZHOU Jianming FAN Qiwen LIU Dezhong YANG Tao HU Renwei YANG Baojun
(*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

Abstract The HI-13 tandem accelerator, located at the Beijing Tandem Accelerator National Laboratory, has been in operation for 35 years. To ensure the continued performance of the accelerator, the operation and maintenance team has prioritized focus on various aspects. The operation team conducted research that involved developing key components, cultivating a high-quality operational team, improving the machine time efficiency, and increasing the participation of users outside the China Institute of Atomic Energy (CIAE). The primary emphasis has been on developing key components and upgrading subsystems. These efforts have successfully maintained and improved the accelerator's performance, ensuring its safe and stable operation. Finally, the paper alse discusses the challenges faced by tandem accelerators and presents future development plans.

Key words HI-13 tandem accelerator, Operation and maintenance, Key component development, Upgrading of subsystems

北京串列加速器核物理国家实验室HI-13串列加速器是我国20世纪80年代初从美国高压工程公司引进的，于1987年8月通过国家验收正式投入运行，迄今已安全稳定运行了35年之久。该加速器按

第一作者：李康宁，男，1977年出生，2011年于中国原子能科学研究院获博士学位，正高级工程师，从事于核技术应用及核测控技术研究，E-mail：likangning@126.com
收稿日期：2023-06-19，修回日期：2023-07-11
First author: LI Kangning, male, born in 1977, graduated from China Institute of Atomic Energy with a doctoral degree in 2011, senior engineer, engaged in the application of nuclear technology and research on nuclear measurement and control technology research, E-mail: likangning@126.com
Received date: 2023-06-19, revised date: 2023-07-11

照对国内外开放的模式来运行与管理，主要开展了核数据测量、核物理基础研究、核技术应用基础研究和交叉学科研究。

在过去的35年里，串列加速器运维团队守正创新，担当作为，不仅采取了一系列措施保持了这台加速器的性能，而且根据实际实验需要提升了加速器的部分性能指标。在新的形势下，串列加速器运维团队面临着设备日益老化以及严峻的国际发展环境，更加需要发扬严谨求实、创新奉献精神，不断总结运维经验，加强国内国际间交流合作，继续运维好、管理好、使用好这台串列加速器。在35年的运维过程中，所采取的措施以及当前面临的困难将在文中进行详细阐述。

1 HI-13串列加速器运行状态简述

串列加速器自1988年投入运行至今，保持了良好的运行状态，年开机时数和供束时数统计如图1所示。从1988年开始至1994年开机时数和供束时数均稳步增长，加速器运行逐步进入稳定状态。在图1中需要解释的是：在2002年开机时数和供束时数剧减是由于开展了加速管技改所致；2006年开机时数和供束时数减少是由于串列加速器注入器升级改造的影响；2017年开机时数和供束时数减少是由于配合核物理所专项超导直线调试所致，即使在疫情期间，实验室积极协调用户，提高开机效率，开机时数和供束时数均未受到明显影响。自加速器投入运行35年以来，年平均开机时数为3 850 h，平均供束时数为3 350 h。目前，加速器运行状态良好，每年稳定开机4 000 h左右，具有铯溅射源、双等离子体源、锂电荷交换源三种离子源，能提供H、D、He、Li、O、F、S、Ge、Au等60多种束流。截至2023年3月份，串列加速器完成开机运行14万小时，供束11.7万小时。

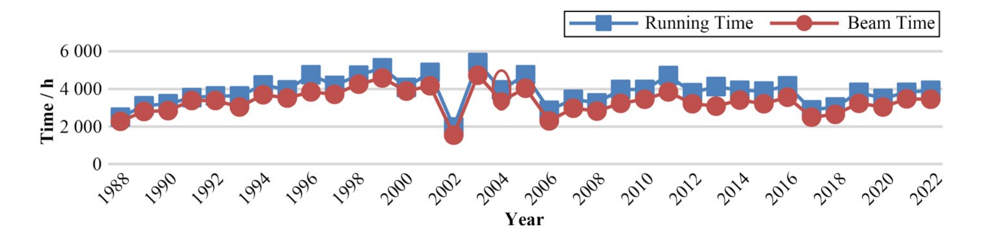


图1 HI-13串列加速器开机及供束机时数统计图
Fig.1 Statistics of running time and beam time of HI-13 tandem accelerator

2 主要关键部件研制及运维改进措施

2.1 第二剥离器研制

第二剥离器的研制于1992年完成，增加了被加速离子能量，位置位于第5和第6段加速管之间。第二剥离器主要包括：控制装置、驱动装置、换向装置、传动装置、变速装置、剥离膜传动、间歇机构以及支撑和固定机构等。

研制完成的第二剥离器系统具有如下性能：1）箔膜的重复位置误差小于0.4 mm；2）剥离器可承受外压1.04 MPa；3）剥离器内部真空度达到1.2×10^{-4} Pa；4）在加速器高能区，离子束流相同时，能量可提高10~30 MeV，能量相同时，束流强度可提高约10倍。经过实际测试，第二剥离器性能达到或优于国际同类装置水平[1]。

2.2 国产束流管道的研制

串列加速器建成之初，总共安装了6条束流管道。随着加速器运行趋于稳定，科研课题及用户数量的增加，原有的6条管道已远满足不了实验需要。为此，于1989年决定扩建4条新的束流管道，分别安装在开关磁铁后左60°、左50°、左30°和左20°位置上。

新增束流管道的物理设计是以串列加速器的像点为起始点。取束流的初始条件为：粒子种类：O^{16}；电荷态：+7；粒子能量：80 MeV；发射度：40 mm·mrad·$MeV^{1/2}$；初始束半宽：$x=y=1.5$ mm；初始半散角：$x=y=3$ mrad；理论计算的靶点直径均在2 mm之内。

管道的真空、电气、测量、控制等系统的设计均考虑了与原6条管道相应系统的一致性，以减少设备，简化操作，增大可靠性。管道的磁导向器及磁四极透镜的主要性能参数均与美国HVEC公司的同类产品相似，其供电电源与原6条管道上的相应设备共用，通过一组选择开关及相应的栓锁继电器来进行切换。各条管道的真空设备主要有：一台JB-200型抽速为200 L·s^{-1}二极溅射离子泵、一个用于保护加速器主真空系统的气动阀及一个与管道靶室隔离的手动闸板阀。正常的情况下，管道真空能维持在1×10^{-5} Pa之内，当管道真空变为5×10^{-4} Pa时，气动阀

将会自动关闭或无法开启。管道的束流监测系统包括靶前的缝隙仪和法拉第筒。靶前的x,y缝隙仪通过一组共用前置放大器与控制室的表头相连,既可用于调束时的束流位置显示,又可用于控制靶上束斑位置和大小[2-3]。

上述4条束流管道成功投入使用之后,串列加速器又相继增加了右30°、右40°、右70°支、右20°支和左70°等用于加速器超灵敏质谱(Accelerator Mass Spectrometer,AMS)、微束、辐照、天体物理、原子分子、核化学等研究的5条束流管道。目前,串列加速器由原先的6条束流线增加到15条,大大拓展了应用领域,方便了用户实验,提高了机时的利用效率。

2.3 输电梯的改进

2.3.1 输电梯国产化

由于串列加速器上的输电梯是长期连续运行的设备,其主要部件为尼龙绝缘子、无油轴承、销轴等,是易损部件,一条输电梯的平均寿命只有6 000 h左右。若无备品,就只能将旧梯从加速器上撤下解体,清洗主要金属部件后与新购置的尼龙绝缘子、无油轴承等重新组装后再装入加速器,这一过程一般要一个月的时间,在这期间实验人员只能等待,大大影响了加速器的开机效率;若有备品,则只是个撤换过程,可以大大减少检修时间。然而,进口输电梯价格昂贵,当时一条梯子的价格需要近百万元人民币。综合以上因素,串列实验室科技人员在20世纪80年代末就开始了输电梯的国产化研制。

串列加速器输电梯总长22.3 m,环绕在两直径各为51 cm、中心距为10.3 m的主从动轮上。其静态张力约为5 338 N。输电梯运行时由主动轮驱动,以线速度12.3 $m\cdot s^{-1}$高速转动。加速器正常工作时,输电梯处于高电压梯度区,最大电压梯度达1.84 $MV\cdot m^{-1}$。这就要求输电梯必须运行平稳,其横向摆度须在1.5 mm以下。组成输电梯的主要部件之一——尼龙绝缘子必须具有很好的机械强度、耐磨损、耐高电压、抗击穿等。其转动轴承必须是特殊的无油轴承。

无油轴承采用了内表面压着一层细铜网以增加润滑剂(聚四氟乙烯加铅粉)的附着强度的钢板卷制轴承。多年使用表明,此种无油轴承优于美国产品,价格不及美国产品的1/20。

尼龙绝缘子是输电梯的关键部件之一,其研制难点在于,尼龙绝缘子必须同时满足能耐高电压和有良好的机械强度。尼龙绝缘子两孔间距离只有13.3 mm,必须承受52 kV以上的电压,即:硬度大、不易磨损、抗拉伸、耐击穿,而又韧性好、抗冲击、不易断裂,经过与国内有关单位合作,对不同配方、不同工艺生产的多种尼龙材料进行了多次力学性能与电气性能的测定。终于找到了一种较为理想的材料,由于尼龙材料的温度系数较大,为充分保证加工精度,尼龙绝缘子的加工要求在恒温车间进行;使用前需先进行真空干燥除湿除气。用此材料做出成品与国外产品进行了性能对比试验,关键指标均优于国外产品[4-5]。

1996年完成绝缘子国产化研制之后,在总结多年的使用经验后,在2022年又优化了配方,使得硬度和抗拉能力进一步提升。

2.3.2 输电梯检修改进

输电梯的检修时间在加速器总的检修时间所占比重最大,因此,缩短输电梯的检修时间是提高检修效率的关键。在不考虑2002年加速管技改以及2022年输电梯异常故障的特殊因素之外,通过图2、3 HI-13串列加速器开钢筒次数和检修天数统计图可以看到,加速器开钢筒的次数和检修天数从2016年开始有了较大的减少,这得益于对于输电梯无油轴承的改进。之前,安装输电梯采用新旧无油轴承混用的方式,导致不同磨损程度的无油轴承混合使用,容易发生故障。另外,在分析多年输电梯检修经验的基础上,无油轴承的硬度和耐磨性是影响性能的关键因素,用60Si2Mn的弹簧钢代替了原先的45#钢或40Cr钢,新改进的无油轴承可重复使用,使用时间明显延长。另外,每次更新输电梯光无油轴承就可节约万元成本。

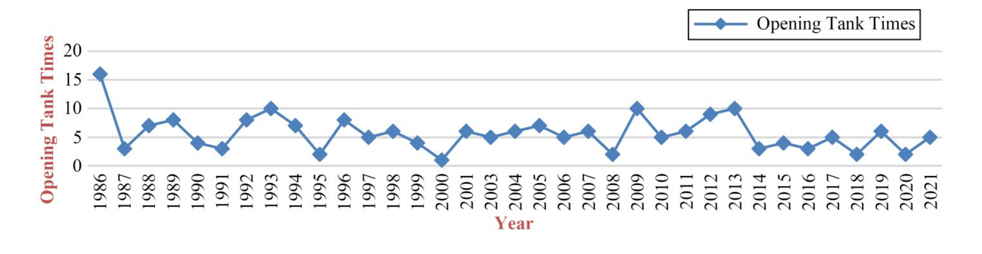


图2 HI-13串列加速器开钢筒次数统计图

Fig.2 Plot showing the frequency of opening the HI-13 tandem accelerator tank over the years

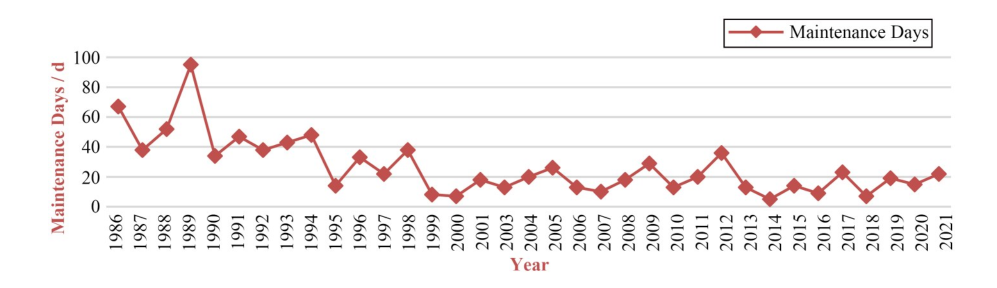


图3 HI-13串列加速器开钢筒检修天数统计图
Fig.3 Statistics of time taken for maintenance work after opening the HI-13 tandem accelerator tank over the years

2.4 分压电阻研制

串列加速器高压电极两侧即低能端和高能端各有4段加速管及相应的4段绝缘支柱，每段加速管和相应的绝缘支柱有72个加速间隙，间距25.4 mm，每间隙之间跨接一个1 200 MΩ电阻。由于束流传输要求，在第一号加速管和相应的绝缘支柱的前18个间隙上跨接600 MΩ电阻。加速管和绝缘支柱的分压电阻链分别由588个1 200 MΩ和18个600 MΩ电阻串联组成，两个电阻链共有1 152个分压电阻。

串列加速器使用的是美国HVEC公司研制的电阻，每个小电阻间有放电间隙保护，是由20个60 MΩ的小电阻串联而成，并被封在环氧树脂中，整个电阻又有一个放电间隙保护。串列加速器在13 MV下运行时，贮能35 kJ。当高压打火时，会严重损坏加速器部件。为了防止加速器高压打火时分压电阻被击穿损坏，除了分压电阻自身气隙保护外，在电阻间安装了铝屏蔽板，即采用平板电容式屏蔽来保护电阻。HVEC公司兰电阻在加速器高压打火时，易被损坏(电阻完全被击穿或阻值超过允许范围)，加速器不能稳定运行在额定高压下，迫使开钢筒检修。此外，HVEC公司研制的兰电阻还存在较严重的老化问题，且价格昂贵(当时每个电阻450美元)，因此，分压电阻的国产化研制迫在眉睫。

在测试了同轴管式电阻和框架式电阻分压系统的基础上，选用了框架式电阻分压系统。与国内科研单位联合研制完成的RHY-35型高压电阻，阻值600 (1%±10%) MΩ，耐压35 kV，尺寸Ø10 mm×140 mm，费用仅为进口的1.6%。国产化后的分压电阻阻值稳定，耐高压性能良好，采用框架式电阻分压系统保护电阻，安全可靠，电阻故障率大为降低。不仅减少了检修时间，也节约了大量经费[6]。

2.5 加速器管技改

串列加速器加速管技术改造是在串列加速器运行了15年、提供束流时间累计5万多小时后进行的，于2002年9月底完成，历时1年10个月。用1根243.8 cm和7根223.5 cm的加速管替代了已使用16年之久的8根182.9 cm加速管。为配合新加速管的安装对加速器的主体布局进行了调整。对加速器的死区结构、充电系统、电阻分压系统进行了改造，重新设计制作了加速管入口栅网透镜及供电和控制系统。研制了新的输电梯死区惰轮。改造后的加速管提升了头部电压，头部电压达到15.07 MV[7]。

加速管改造完成当年，先后为核数据测量、材料辐照、微束研究和天体物理实验等8个课题提供了9种粒子754 h的束流。运行时加速器最高头部运行电压达14.21 MV，最低头部电压为4.26 MV。加速器运行平稳，其中有的实验是加速器加速管技术改造前无法完成的。

2.6 注入器升级改造

为了新的实验需要，2007年完成的串列加速器注入器的升级改造主要有以下考虑：1)加速器分析磁铁后将建一超导增能器，但原有单漂移聚束器不能满足相应的相位匹配要求，注入器后面须建一台双漂移聚束器，不同种类离子的能量范围为100~290 kV，则注入器台架电压要由原先的150 kV升至300 kV；2)重核素的AMS实验时，为把重同位素分开，注入器质量分辨率应在核素质量数以上，但有些核素是以分子离子形式引出，因此分辨率应好于380，而原有注入器质量分辨率只有80；3)原有注入器系统只有一台离子源，换源、检修等影响开机效率，新的注入器系统可同时安装两台离子源，以提高开机效率。研制完成的注入器系统建立了两条注入线：一条为高分辨AMS注入线，另一条为300 kV高能量注入线，可以安装铯溅射源、双等离子体源或交换源，可满足不同实验需要。

注入器改造完成后，各项指标均已达到预定指标，高压台架的电位提高使整个加速器传输效率提高了一倍。注入器系统故障率明显降低，束流稳定性也有了很大提高[8-9]。

在注入器使用的三种离子源中，铯溅射源的使用频次和机时最多，而进口的溅射源存在价格昂贵、换靶装置存在驱动气路容易堵塞的弊端。运维人员

在2018年与国内科研机构完成了国产化的研究，自研的离子源采用伺服电机驱动换靶，靶位精准且具有微调功能，能同时安装40个靶锥，束流指标达到国际水平，且价格为进口的50%[10]。

2.7 剥离膜的制备技术升级

针对使用交直流碳弧法制备的碳剥离膜用于大流强低能重离子的剥离时寿命太短的弊端，采用磁过滤阴极真空弧（Filtered Cathod Vacuum Arc，FCVA）技术制备了质量厚度为5~7 μg·cm^{-2}的类金刚石碳（Diamond-like Carbon，DLC）剥离膜。用XP2U型精密电子天平测试分析了100 mm范围内的DLC剥离膜均匀性，结果显示，其最大不均匀性小于10%。通过扫描电子显微镜（Scanning Electron Microscope，SEM）、原子力显微镜（Atomic Force Microscope，AFM）、万能摩擦磨损试验机和X光电子谱（X ray Photoelectron Spectroscopy，XPS）测试分析了DLC剥离膜的表面形貌、耐磨损特性和结构，结果显示，采用双90° FCVA技术沉积的DLC剥离膜表面光滑致密、耐磨，几乎没有大颗粒的污染，表征金刚石特性的sp3键含量超过70%。在串列加速器上使用$^{107}Ag^-$、$^{70}Ge^-$、$^{48}Ti^-$、$^{28}Si^-$、$^{197}Au^-$和$^{127}I^-$ 6种典型质量的离子束对质量厚度为5~7 μg·cm^{-2}的DLC剥离膜和碳剥离膜寿命进行测试比较，结果显示DLC剥离膜寿命比碳剥离膜的高2.6~10倍，缩短了检修时间，有效提升了开机效率[11]。

2.8 控制技术升级改造

串列加速器原有的控制系统采用的是传统的开关、继电器的控制方式，随着运行时间的增长，元器件老化日益严重。另一方面，近些年来信息技术的飞速发展，为串列控制系统改造提供了技术保证。改造后的控制系统大大提升了加速器控制系统的自动化水平。目前，串列加速器注入器系统[12]、真空监测系统、辅机系统以及辐射安全连锁系统均已实现了改造。通过这些改造，不仅克服了元器件老化问题，也减少了运行人员的工作量，提高了加速器运行的保障水平。

3 加强制度建设，练就过硬本领，提高检修效率

串列实验室建成之初就成立了串列国家实验室学术委员会，根据串列加速器的目标、任务和研究方向，审议实验室的重大学术活动、年度工作，审批开放研究课题，审议和批准实验室的束流分配方案。把有限的束流机时向重点任务、国家急需的方向倾斜。

运维人员的水平也直接影响到检修效率，因此实验室非常注重对运维人员的培养。首先，实验室建立了包括《HI-13串列加速器运行质量保证大纲》等近10项规章制度，分专业编制了培训教材和操作规程，并根据加速器改造情况及时修订。建立了上岗前培训，上岗时以老带新，不定期考核，经过多种培训方式之后，进行综合评估，练就了一支技术过硬的运行人员队伍。

另外，充分挖掘大量既往运行参数数据，针对不同种类离子的特点，结合加速器运行状态，进行分析总结，并贯穿于日常运行中。运维团队设计开发了束流调试数据库程序，根据物理实验人员提出的离子能量或头部高压及所要求的束流强度后，自动计算出所需的参数，大大提高了调束效率。

4 取得的成绩、面临的问题及未来的发展规划

4.1 物理实验成果

自串列加速器投入运行，取得了一批具有国际、国内重要影响的科研成果，其中获国家自然科学奖两项、国家科学技术进步奖8项，国防科学技术奖30项，在国内外核心期刊发表论文1 967篇，其中SCI收录1 151篇。串列加速器实验室已成为我国重要的核科学研究中心和高级核科学研究人员的培养基地，为国家培养了一批核科技高级人才，并与来自国内50多家研究单位和美、英、韩、日、俄、德、意等国的科学家开展了合作研究，建立了良好的国内国际合作关系。

串列加速器也十分重视新技术新方法新实验的研究。例如，在2019年首次完成了在北京放射性核束装置（Beijing Radioactive Ion Beam Facility，BRIF）上进行了后加速在线同位素分离（Isotope Separator On-Line，ISOL）束实验，验证了北京放射性核束装置后加速ISOL束开展物理实验的方法与技术，为后续开展奇异原子核物理实验奠定重要基础，对国际同类装置开展相关实验研究有重要借鉴意义。科研人员研究了在高于库仑势垒能量下稳定核Na与双幻核Ca的弹性散射角分布。实验证明，用北京放射性核束装置的ISOL束在靶室中用硅探测器阵列测量的角分布，与用非ISOL束在几乎相同能量下用高精度Q3D磁谱仪测量的角分布一致。该研究结果发表于我国SCI期刊*Nuclear Science and Techniques*，并被选为该期刊2021年推荐论文[13]。

4.2　面临的问题

虽然通过运维团队的不懈努力，建立健全了成熟有效的管理模式，保持了串列加速器良好的运行状态，但是对于这样已经运行了35年的大型加速器来讲，设备老化是不可回避的问题。在过去的时间里，对于一些关键部件的研制虽取得了较好的效果，但是还有一些关键器件缺乏技术储备和研制经验。特别是近年来，严峻的国际发展环境，发达国家对我国国防工业实施禁售政策，导致了一些器件无法从国外采购，给未来的运行带来了不可预料的影响。

4.3　发展规划

对于未来的展望有以下两点：

第一，继续运维好串列加速器：以现有技术储备为基础，深入开展关键部件的自主化研制，更好地运行好串列加速器。争取将30多年的运维经验运用到物理所专项超导直线加速器、重离子回旋加速器的运维中，更好地服务好加速器集群的运维。

第二，开展MV级串列加速器的研制任务：通过对串列加速器35年的运维，积累了大量的理论实践和运维经验，具备了研制MV级以上加速器的能力。目前，依托串列加速器实验室科技人员，正在研制6 MV、3 MV及1.7 MV串列加速器。相信通过不懈努力，不仅能打破国外对于高压加速器的垄断局面，而且能提升我国高压型加速器的研制能力。另外，由于关键部件研制和整机安装调试能力的提升，必将进一步提高HI-13和国内其他高压型加速器的运维水平。

5　结语

串列加速器已经安全稳定运行了35年，在这期间运维团队一直在实践与创新，根据实际工作对串列加速器进行改进。在新的形势下，对于这台已经运行了35年的加速器，运维过程中会更加需要不断创新，对于关键部件进行自主研制。同时，对于取得的运维经验要充分挖掘，做好新设备的研发工作，更好地服务于科研，推动我国核物理事业发展。

致谢　感谢自串列加速器建成以来，关心或从事于串列加速器运维的科技工作者。

作者贡献声明　本文由李康宁编写，阚朝新、王晓飞、胡跃明、杨丙凡、关遐令、周建明、胡任威等完成了电气电子学的运维和技改；李康宁、秦久昌、包轶文、游曲波等负责了注入器的运维和升级改造；苏胜勇、王华、刘德忠、杨涛、杨保君等负责了主机及真空等的检修及技改；李康宁、周建明等负责了控制系统的升级改造任务；樊启文等负责了剥离膜的制备及研究工作。需要说明的是串列加速器重要的升级改造，都是不同专业人员共同参与，协作完成的。

参考文献

1　秦久昌, 杨为民, 杨丙凡. HI-13串列加速器的第二剥离器系统研制[J]. 原子能科学技术, 1995, **29**(2): 97－101.
QIN Jiuchang, YANG Weimin, YANG Bingfan. Development of second stripper on HI-13 tandem accelerator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1995, **29**(2): 97－101.

2　杨丙凡. HI-13串列加速器国产束流管道的研制[J]. 中国原子能科学研究院年报, 1991(1): 70－71.
YANG Bingfan. Development of domestic beam pipeline for HI-13 tandem accelerator[J]. Annual Report of China Institute of Atomic Energy, 1991(1): 70－71.

3　柳卫平, 李志常, 关遐令, 等. HI-13串列加速器次级束流线的设计[J]. 原子能科学技术, 1993, **27**(5): 391－395.
LIU Weiping, LI Zhichang, GUAN Xialing, *et al*. Design of a beam line for secondary radioactive ions[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1993, **27**(5): 391－395.

4　杨丙凡, 周俊峰, 关遐令, 等. HI-13串列加速器输电梯的研制[J]. 原子能科学技术, 1996, **30**(3): 193－198.
YANG Bingfan, ZHOU Junfeng, GUAN Xialing, *et al*. Laddertron development in Beijing HI-13 tandem accelerator lab[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1996, **30**(3): 193－198.

5　杨丙凡, 周俊峰, 关遐令, 等. 国产化输电梯研制成功[J]. 中国原子能科学研究院年报, 1994(1): 91－93.
YANG Bingfan, ZHOU Junfeng, GUAN Xialing, *et al*. Successful development of home-made elevator[J]. Annual Report of China Institute of Atomic Energy, 1994 (1): 91－93.

6　张桂莲, 秦久昌, 侯德义, 等. HI-13串列加速器框架式电阻分压系统的改造[J]. 原子能科学技术, 2001, **35**(4): 207－213. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6931.2001.04.006.
ZHANG Guilian, QIN Jiuchang, HOU Deyi, *et al*. Improvement of the frame type resistor divider system for the HI-13 tandem accelerator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2001, **35**(4): 207－213. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6931.2001.04.006.

7　杨丙凡, 秦久昌, 张桂莲, 等. HI-13串列加速器加速管技术改造[J]. 原子能科学技术, 2003, **37**(6): 513－518. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6931.2003.06.008.
YANG Bingfan, QIN Jiuchang, ZHANG Guilian, *et al*.

Up-grading of accelerating tube on HI-13 tandem accelerator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2003, **37**(6): 513 – 518. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-6931. 2003.06.008.

8 包铁文, 关遐令, 胡跃明, 等. 北京HI-13串列加速器注入器的升级改造[J]. 核技术, 2007, **30**(12): 1001 – 1002. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-3219.2007.12.010.
BAO Yiwen, GUAN Xialing, HU Yueming, *et al*. Upgrading the injector system of Beijing HI-13 tandem accelerator[J]. Nuclear Techniques, 2007, **30**(12): 1001 – 1002. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-3219.2007.12.010.

9 包铁文, 范宏盛, 关遐令, 等. HI-13串列加速器升级工程器注入器升级改造2006年进展[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2006: 67 – 68.
BAO Yiwen, FAN Hongsheng, GUAN Xialing, *et al*. HI-13 tandem accelerator upgrade engineering injectors upgrade and transformation progress in 2006[J]. Annual Report of China Institute of Atomic Energy, 2006: 67 – 68.

10 郭巍, 李康宁, 游曲波, 等. 多靶强流铯溅射离子源的研制[J]. 原子核物理评论, 2022, **39**(3): 311 – 316. DOI: 10. 11804/NuclPhysRev.39.2021055.
GUO Wei, LI Kangning, YOU Qubo, *et al*. Development of a multi-sample high intensity Cs sputter ion source[J]. Nuclear Physics Review, 2022, **39**(3): 311 – 316. DOI: 10. 11804/NuclPhysRev.39.2021055.

11 樊启文, 杜英辉, 张榕, 等. 类金刚石碳剥离膜的制备及其性能研究[J]. 原子能科学技术, 2015, **49**(8): 1509 – 1514. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.08.1509.
FAN Qiwen, DU Yinghui, ZHANG Rong, *et al*. Preparation and property investigation of diamond-like carbon stripper foil[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, **49**(8): 1509 – 1514. DOI: 10.7538/yzk. 2015.49.08.1509.

12 李康宁, 李兴, 游曲波, 等. 基于虚拟仪器的网络控制系统在加速器中的设计实现[J]. 核科学与工程, 2007, **27**(4): 359 – 364. DOI: 10.3321/j. issn: 0258-0918.2007. 04.013.
LI Kangning, LI Xing, YOU Qubo, *et al*. Design and realization of network control system based on virtual instrument in the field of accelerators[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2007, **27**(4): 359 – 364. DOI: 10.3321/j.issn: 0258-0918.2007.04.013.

13 Nan W, Guo B, Lin C J, *et al*. First proof-of-principle experiment with the post-accelerated isotope separator on-line beam at BRIF: measurement of the angular distribution of $^{23}Na+^{40}Ca$ elastic scattering[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, **32**(5): 53. DOI: 10.1007/ s41365-021-00889-9.